

RESUMEN

Este anexo hace referencia a las características de las partículas de estudio y del medio fluidizante, a la metodología experimental que se aplicó para determinar los parámetros y propiedades objetos de estudio, a la planificación que se siguió para realizar los ensayos experimentales en la columna de fluidización existente en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Química.

SUMARIO

RESUMEN.....	1
SUMARIO.....	1
D.1. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	3
D.1.1. Partículas de estudio	3
D.2. CARACTERIZACIÓN DEL LECHO DE PARTÍCULAS.....	3
D.2.1. Método experimental	4
D.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	7
D.3.1. Datos generales de la columna de fluidización	7
D.3.2. Resultados de la caracterización de las partículas.....	7
Primera prueba experimental.....	7
Segunda prueba experimental.....	11

D.1. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Los parámetros (velocidad mínima de fluidización, caída de carga) para cada prueba realizada se obtienen a partir de los datos experimentales. Posteriormente se realizó un análisis de la influencia de las propiedades de las partículas sobre estos parámetros mencionados.

D.1.1. Partículas de estudio

Las partículas de estudio fueron agujas de *Pinus Halepensis*, conocido como pino blanco, es una especie que se encuentra distribuida casi por toda el área mediterránea y representa aproximadamente el 20% de la superficie arbolada. Si crecen en condiciones adecuadas pueden alcanzar una longitud de 25 m de altura y llegar a unos 200 años de edad [Beltrán, et al., 2011, p. 5].



Figura D. 1 Bosque adulto de pino blanco en el litoral catalán

El medio fluidizante fue aire en condiciones ambiente, suministrado por un compresor (CompAir, Mod. PROPACK 250-100 PM).

D.2. CARACTERIZACIÓN DEL LECHO DE PARTÍCULAS

Los parámetros mencionados se determinan a través de las correlaciones empíricas (método teórico) y experimentalmente a través del método de permeametría (método experimental).

D.2.1. Método experimental

El método experimental esta basado en la permeabilidad del lecho (Casal et al., 1985) por su sencillez, exactitud y la posibilidad de repetir los experimentos sin mucha dificultad. Este método se basa en representar gráficamente las curvas de fluidización y desfluidización, que permiten obtener el factor de forma y la superficie específica externa.

Aplicación del método experimental

El procedimiento consistió en:

- Pesar una muestra representativa de las agujas de pino. Introducir en la columna de fluidización, compactar por acción mecánica (con unos palmadas en la pared de la columna), en estas condiciones medir la altura del lecho con la ayuda de la escala milimétrica (ver Figura D. 2).
- Dejar circular el flujo a través de la columna de manera creciente controlando a través de un convertidor de frecuencia que permite variar la velocidad del flujo hasta lograr alcanzar que las partículas queden suspendidas en el flujo (si es posible). Registrar simultáneamente la velocidad y la caída de presión que experimenta el flujo al pasar por el lecho de partículas. Si se logra fluidizar, en un determinado momento la caída de presión se mantendrá constante, en ese instante se mide la altura del lecho. A continuación se procede con el proceso inverso (desfluidización), que consistió en:
- Disminuir el caudal del flujo hasta llegar a cero y anotar los datos de caídas de presión, velocidad como en el proceso anterior; al finalizar se mide la altura final del lecho de las partículas.
- Realizar los cálculos respectivos y luego representar gráficamente para ambos procesos la caída de presión del flujo en función a su velocidad, como resultado se obtienen dos curvas una de fluidización y otra de desfluidización.



Figura D. 2 Prueba experimental con agujas de pino en la columna de fluidización

El procedimiento que se realizó previamente para estudiar las agujas de pino consistió en:

- Recoger muestras con y sin tallo de agujas de pino
- Deshojar las agujas de sus tallos y posteriormente clasificarlas para eliminar agujas degradadas, ramas secas y residuos de otras especies.
- Secar a 60 °C en una estufa con el objetivo de uniformizar el contenido de humedad de la muestra ver Figura D. 3.
- Seleccionar de forma visual para que tengan una longitud más o menos homogénea, luego medir la longitud y diámetro con un calibrador vernier. Obtener una longitud media de las agujas es laborioso, ya que no todos tienen idénticas dimensiones, por tanto se fijó una longitud como referencia y se escogió una a una en torno a la longitud fijada, la finalidad de este proceso es obtener un lecho formado por agujas de dimensiones homogéneas.
- Del conjunto seleccionar al azar muestras de 50 partículas para calcular la longitud y el diámetro promedio (l_m) y (d_m). Con estos datos se calculan los diámetros

equivalentes con las ecuaciones (Eq. 3.8), (Eq. 3.32) y (Eq. 3.33). El peso de las partículas se determina en base a la lectura que se toma de una balanza de precisión $\pm 0,001\text{g}$.



Figura D. 3 Secado de las agujas de pino a 60°C.

Determinación de la velocidad mínima de fluidización

Se determina del grafico realizado, en el que las rectas que describen el comportamiento hidrodinámico se interceptan y este punto de intercepción corresponde a la velocidad mínima de fluidización.

Estudio del efecto de la velocidad del fluido sobre el gradiente de presión

Para conocer el efecto del incremento de la velocidad de flujo sobre la caída de presión, se mide la caída de carga del lecho a medida que se va incrementando la velocidad del flujo para una determinada muestra. Con los datos obtenidos se representa gráficamente la caída de presión en función de la velocidad.

Estudio del efecto de la porosidad sobre el gradiente de presión

Para conocer el efecto de la porosidad sobre la caída de presión, se mide la caída de presión para diferentes porosidades (diferentes masas de muestra) y se va incrementando la velocidad del flujo. Con los datos obtenidos se representa gráficamente la caída de presión en función de la velocidad para cada muestra con su respectiva porosidad.

D.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

D.3.1. Datos generales de la columna de fluidización

Las características de la columna de fluidización se detallan en la Tabla D. 1.

Tabla D. 1 Columna de fluidización gas-sólido

Parámetro	Dato obtenido
Área de sección transversal [m ²]	0,00454
Altura total de la zona de fluidización [m]	0,9
Volumen total de la zona de fluidización [m ³]	0,0408

D.3.2. Resultados de la caracterización de las partículas

Caracterización experimental de parámetros hidrodinámicos de las partículas

Primera prueba experimental

Tabla D. 2 Condiciones de trabajo para el primer desarrollo experimental

D _c = 0,076 [m]							
Tipo de partícula	d _m [m] x10 ⁻⁴	l _m [m]	ρ _p [kg/m ³]	L [m]	L / D _c	m _p [kg]	Q [N m ³ /h]
Agujas de pino	7,03	0,07-0,075	870	0.085	1,12	0.015	0,0 – 1,8

En la Tabla D. 2 se resume las condiciones de trabajo como la altura de llenado, (masa del lecho), las propiedades geométricas e hidrodinámicas de las partículas de estudio (ver Figura D. 4), los ensayos inicialmente se realizaron en función del rotámetro cuyo rango de medición es de 0,0 a 1,8 N h/m³.



Figura D. 4 Agujas de pino de 0,07- 0,075 de longitud promedio.

Tabla D. 3 Resumen de resultados de tres pruebas experimentales

EXPERIMENTO 1								
Q [N·m ³ /h]	Altura [cm]	u [m/s]	ΔP [Pa]	ρb	ε	Re	log(ε)	log (Re)
0	8,3	0	0	39,80680	0,95425	0	-0,02034	-
0,3	8,3	0,01836	0,1	39,80680	0,95425	0,839794	-0,02034	-0,0758
0,5	8,3	0,03059	0,2	39,80680	0,95425	1,399657	-0,02034	0,1460
1	8,3	0,06118	0,3	39,80680	0,95425	2,799315	-0,02034	0,4471
1,5	8,3	0,09178	0,4	39,80680	0,95425	4,198972	-0,02034	0,6231
1,8	8,4	0,11013	0,4	39,33291	0,95479	5,038767	-0,02009	0,7023
1,7	8,4	0,10401	0,4	39,33291	0,95479	4,758835	-0,02009	0,6775
1,4	8,4	0,08566	0,3	39,33291	0,95479	3,919041	-0,02009	0,5932
1	8,4	0,06118	0,2	39,33291	0,95479	2,799315	-0,02009	0,4471
0,6	8,4	0,03671	0,1	39,33291	0,95479	1,679589	-0,02009	0,2252
0	8,4	0	0	39,33291	0,95479	0	-0,02009	-

Continuación de la Tabla D. 3								
EXPERIMENTO 2								
Q [N·m ³ /h]	Altura [cm]	u [m/s]	ΔP [Pa]	ρb	ε	Re	log(ε)	log (Re)
0,0	8,3	0,0	0,0	39,80680	0,95425	0,0	-0,02034	-
0,3	8,3	0,01836	0,1	39,80680	0,95425	0,863	-0,02034	-0,0639
0,6	8,3	0,03671	0,2	39,80680	0,95425	1,73	-0,02034	0,2371
1,15	8,3	0,07036	0,3	39,80680	0,95425	3,31	-0,02034	0,5196
1,55	8,3	0,09484	0,4	39,80680	0,95425	4,46	-0,02034	0,6493
1,8	8,4	0,11013	0,4	39,33291	0,95479	5,18	-0,02009	0,7142
1,7	8,4	0,10401	0,4	39,33291	0,95479	4,89	-0,02009	0,6894
1,45	8,4	0,08871	0,3	39,33291	0,95479	4,17	-0,02009	0,6203
1,05	8,4	0,06424	0,2	39,33291	0,95479	3,02	-0,02009	0,4801
0,6	8,4	0,03671	0,1	39,33291	0,95479	1,73	-0,02009	0,2371
0	8,4	0	0	39,33291	0,95479	0,0	-0,02009	-
EXPERIMENTO 3								
0,0	8,3	0,0	0,0	39,80680	0,95425	0,0	-0,02034	-
0,3	8,3	0,01836	0,1	39,80680	0,95425	0,863	-0,02034	-0,0639
0,6	8,3	0,03671	0,2	39,80680	0,95425	1,73	-0,02034	0,2371
1,15	8,3	0,07036	0,3	39,80680	0,95425	3,31	-0,02034	0,5196
1,55	8,3	0,09484	0,4	39,80680	0,95425	4,46	-0,02034	0,6493
1,8	8,4	0,11013	0,4	39,33291	0,95479	5,18	-0,02009	0,7142
1,7	8,4	0,10401	0,4	39,33291	0,95479	4,89	-0,02009	0,6894
1,45	8,4	0,08871	0,3	39,33291	0,95479	4,17	-0,02009	0,6203
1,05	8,4	0,06424	0,2	39,33291	0,95479	3,02	-0,02009	0,4801
0,6	8,4	0,03671	0,1	39,33291	0,95479	1,73	-0,02009	0,2371
0,0	8,4	0	0	39,33291	0,95479	0,0	-0,02009	-!

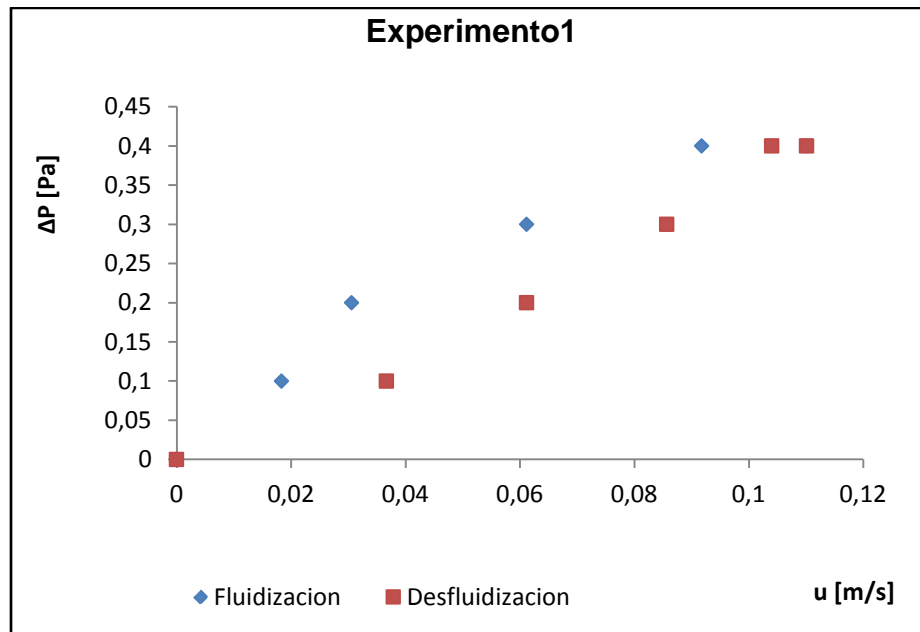


Figura D. 5 Curvas de fluidización y desfluidización experimento 1.

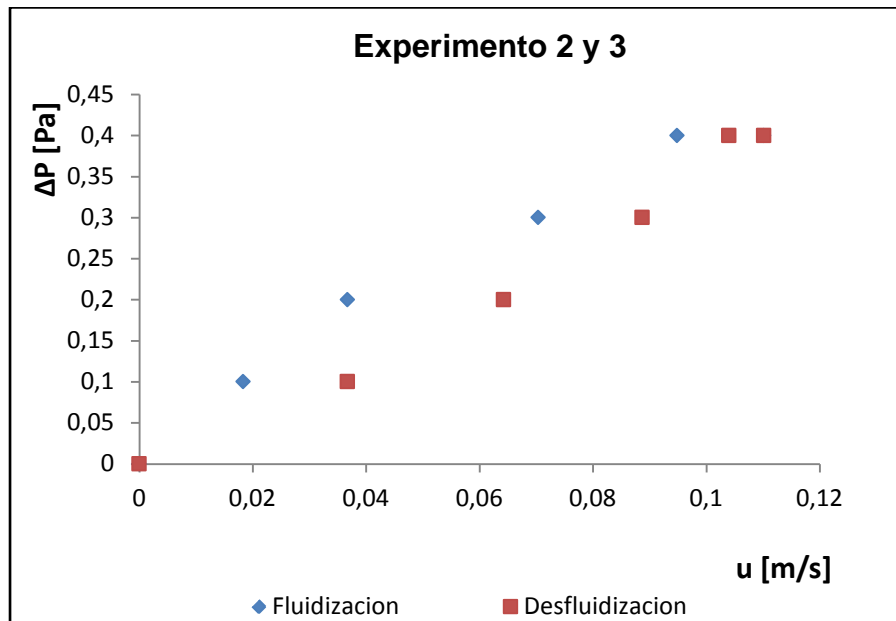


Figura D. 6 Curvas de fluidización y desfluidización experimento 2 y 3.

Observaciones y conclusiones

Los datos de la caída de presión que ha ido experimentado el lecho se detallan en la Tabla D. 3, los cuales se representaron gráficamente en función de la velocidad del flujo de aire, como resultado se observó que a medida que se va incrementando el caudal la caída de carga también va incrementando de forma lineal.

A estas partículas (agujas de pino) no se consiguió fluidizar, esta situación dificultó tomar lecturas de la variación de la altura del lecho (fue poco visible). El hecho de que aun sigue incrementado la caída de carga conforme se va aumentando el caudal del flujo de aire se concluye que aun no se logrado alcanzar la velocidad mínima de fluidización y por tanto tampoco ha sido posible conocer la máxima caída de presión.

Segunda prueba experimental

En la Tabla D. 4 se resume las condiciones de trabajo como la altura de llenado, (masa del lecho), las propiedades geométricas e hidrodinámicas de las partículas de estudio (ver Figura D. 7). Estos ensayos también se realizaron con el rotámetro cuyo rango de medición va de 0,0 a 1,8 N h/m³.

Tabla D. 4 Condiciones de trabajo para el segundo desarrollo experimental

D _c = 0,076 [m]							
Tipo de partícula	d_m [m] $\times 10^{-4}$	l_m [m]	ρ_p [kg/m ³]	L [m]	L/ D _c	m_p [kg]	Q [N m ³ /h]
Agujas de pino	7,04	0,06-0,070	870	0.083	1,09	0.015	0,0 – 1,8



Figura D. 7 Agujas de pino de 0,06-0,070 de longitud promedio.

A continuación se muestra los resultados obtenidos del segundo desarrollo experimental en el que se realizaron tres pruebas, y para determinar los parámetros hidrodinámicos como ya se menciono anteriormente se aplica el método de permeametría (Casal et al., 1985).

Tabla D. 5 Resumen de resultados de tres ensayos del segundo desarrollo experimental

EXPERIMENTO 1					
ΔP [Pa]	L [m]	u [m/s]	ϵ	$\Delta P/L$ [Pa/m]	X
0	0,082	0	0,953687065	0	0
0,1	0,082	0,033651493	0,953687065	1,2195122	0,54553877
0,2	0,082	0,061184533	0,953687065	2,43902439	0,99188867
0,3	0,082	0,085658346	0,953687065	3,65853659	1,38864414
0,4	0,082	0,104013705	0,953687065	4,87804878	1,68621075
0,4	0,083	0,110132159	0,954245053	4,81927711	1,73958191
0,3	0,083	0,107072932	0,954245053	3,61445783	1,69126019
0,2	0,083	0,091776799	0,954245053	2,40963855	1,44965159
0,1	0,083	0,070362212	0,954245053	1,20481928	1,11139955
0	0,083	0,045888399	0,954245053	0	0,7248258
0	0,083	0	0,954245053	0	0
EXPERIMENTO 2					
0	0,082	0	0,95368707	0	0
0,1	0,082	0,03671072	0,95368707	1,2195122	0,5951332
0,2	0,082	0,06730299	0,95368707	2,43902439	1,09107754
0,3	0,082	0,08871757	0,95368707	3,65853659	1,43823858
0,4	0,082	0,11013216	0,95368707	4,87804878	1,78539961
0,4	0,083	0,11013216	0,95424505	4,81927711	1,73958191
0,3	0,083	0,10707293	0,95424505	3,61445783	1,69126019
0,2	0,083	0,08871757	0,95424505	2,40963855	1,40132987
0,1	0,083	0,06730299	0,95424505	1,20481928	1,06307784
0	0,083	0,03671072	0,95424505	0	0,57986064
0	0,083	0	0,95424505	0	0

Continuación de la Tabla D. 5					
EXPERIMENTO 3					
ΔP [Pa]	L [m]	u [m/s]	ϵ	$\Delta P/L$ [Pa/m]	X
0	0,082	0	0,95368707	0	0
0,1	0,082	0,03976995	0,95368707	1,2195122	0,64472764
0,2	0,082	0,06730299	0,95368707	2,43902439	1,09107754
0,3	0,082	0,0917768	0,95368707	3,65853659	1,48783301
0,4	0,082	0,11013216	0,95368707	4,87804878	1,78539961
0,4	0,083	0,11013216	0,95424505	4,81927711	1,73958191
0,3	0,083	0,10707293	0,95424505	3,61445783	1,69126019
0,2	0,083	0,08871757	0,95424505	2,40963855	1,40132987
0,1	0,083	0,07036221	0,95424505	1,20481928	1,11139955
0	0,083	0,04282917	0,95424505	0	0,67650408
0	0,083	0	0,95424505	0	0
		0	0,95368707	0	0

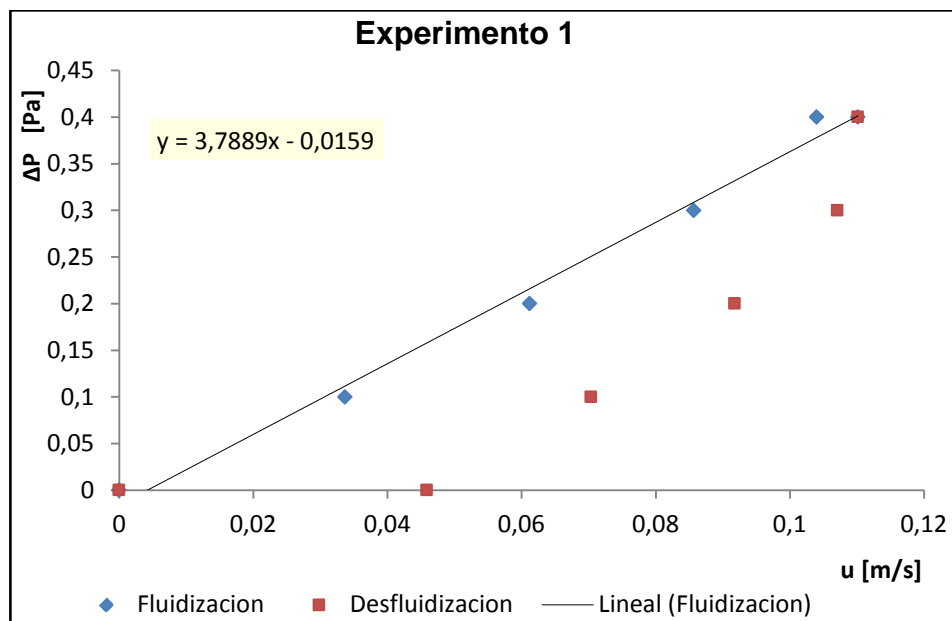


Figura D. 8 Pérdida de carga en el lecho vs. Velocidad de entrada del flujo exp. 1

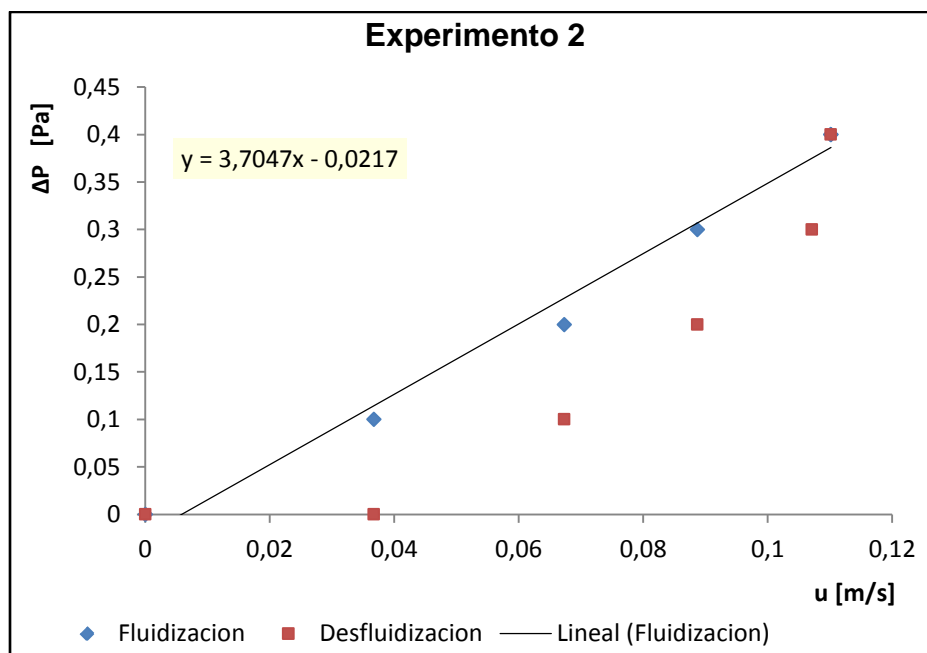


Figura D. 9 Perdida de carga en el lecho vs. Velocidad de entrada del flujo exp. 2.

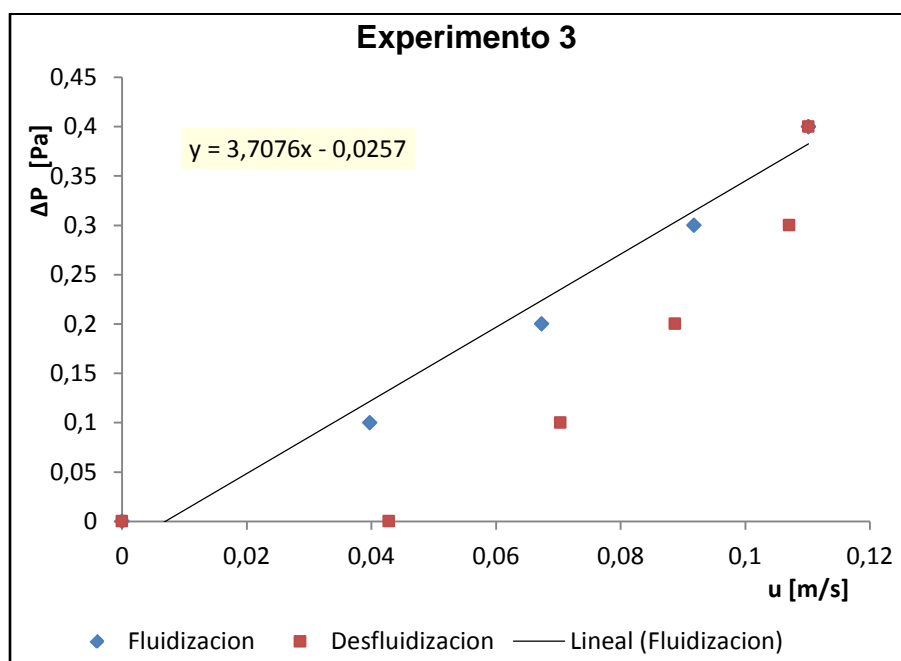


Figura D. 10 Perdida de carga en el lecho vs. Velocidad de entrada del flujo exp. 3.

Observaciones y conclusiones

Al realizar las lecturas de la caída de carga se observó que inició a mayor caudal de flujo a diferencia del primer desarrollo experimental. También se observó que las caídas de carga van incrementando de forma lineal en función del caudal del flujo, debido a la limitación en la aportación del flujo de aire (rango de trabajo del rotámetro) no se ha logrado alcanzar la velocidad mínima de fluidización y por tanto tampoco ha sido posible conocer la máxima caída de presión.

Ante esta situación la tarea pendiente fue buscar un caudalímetro o anemómetro y un generador de flujo que permitan suministrar mayor caudal y mucho mejor si eran compatibles con la instalación utilizada. Pero se presentaron dos inconvenientes por un lado al adaptar el generador de flujo y por otro lado al adaptar los instrumentos de medición, por esta razón se decidió diseñar una nueva instalación versátil de fluidización, que permita llevar a cabo procesos de fluidización con diferentes masas y tipos de combustibles forestales.

- *Determinación del factor de forma*

Para un flujo laminar a través de un lecho fijo de partículas, la pérdida de carga se puede relacionar con la velocidad del fluido utilizando la ecuación de Blake-Kozeny, que proviene de la ecuación de Hagen-Poiseuille para canales intersticiales.

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = K * \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} * \frac{\mu * u}{d_p^2} * \frac{1}{\phi^2} \quad (\text{Eq. D. 1})$$

Para partículas irregulares el valor de la constante se considera 180.

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = 180 * \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} * \frac{\mu * u}{d_p^2} * \frac{1}{\phi^2} \quad (\text{Eq. D. 2})$$

Se representó a esta expresión como una recta y a partir de la pendiente se determinó el factor de forma.

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = x * \frac{1}{\phi^2} \quad (\text{Eq. D. 3})$$

$$x = 180 * \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} * \frac{\mu * u}{d_p^2} \quad (\text{Eq. D. 4})$$

$$y = \frac{(-\Delta P)}{L} \quad (\text{Eq. D. 5})$$

$$y = bx \quad (\text{Eq. D. 6})$$

$$b = \frac{1}{\phi^2} = \text{pendiente} \quad (\text{Eq. D. 7})$$

A continuación se muestra gráficamente los datos de la segunda prueba experimental reflejados en la Tabla D. 5.

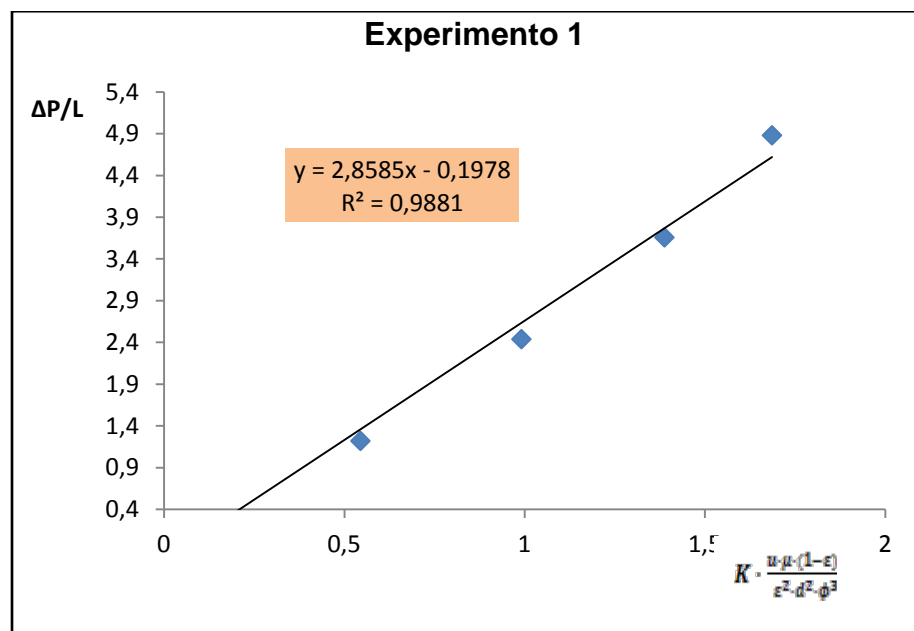


Figura D. 11 Representación gráfica "x vs. y" experimento 1.

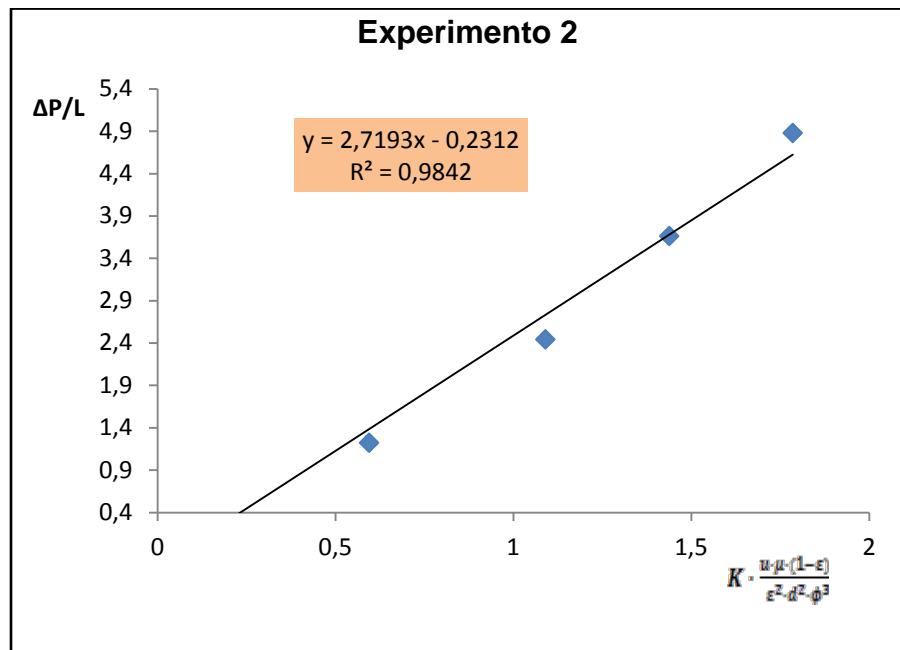


Figura D. 12 Representación grafica “x vs. y” experimento 2.

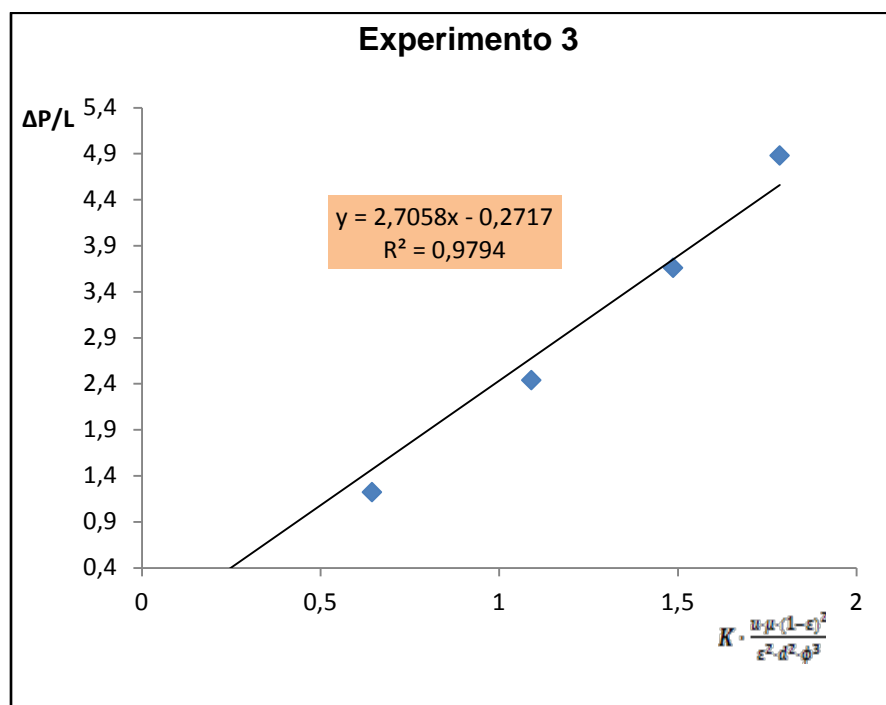


Figura D. 13 Representación grafica “x vs. y” experimento 3.

Tabla D. 6 Factor de forma a partir de los datos experimentales

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Media experimental
m	2,8585	2,7193	2,7058	2,77
Φ	0,587	0,606	0,608	0,600

Conclusiones

Los resultados obtenidos del factor de forma calculado a partir de los datos experimentales son superiores en los tres casos con respecto al valor teórico calculado en el diseño. Estos datos no se pueden considerar como fiables debido a los fallos que se han producido a lo largo del desarrollo experimental.

- **Determinación de la Permeabilidad**

Experimentalmente la permeabilidad se determinó utilizando la ley de Darcy.

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} u \quad (\text{Eq. D. 8})$$

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K} u \quad (\text{Eq. D. 9})$$

$$y = -\frac{\Delta P}{L} \quad (\text{Eq. D. 10})$$

$$m = \frac{\mu}{K} \quad (\text{Eq. D. 11})$$

$$y = m x \quad (\text{Eq. D. 12})$$

Representando gráficamente el gradiente de presión en función de la velocidad del caudal (datos de la Tabla D. 5), se determina la permeabilidad a partir de la pendiente.

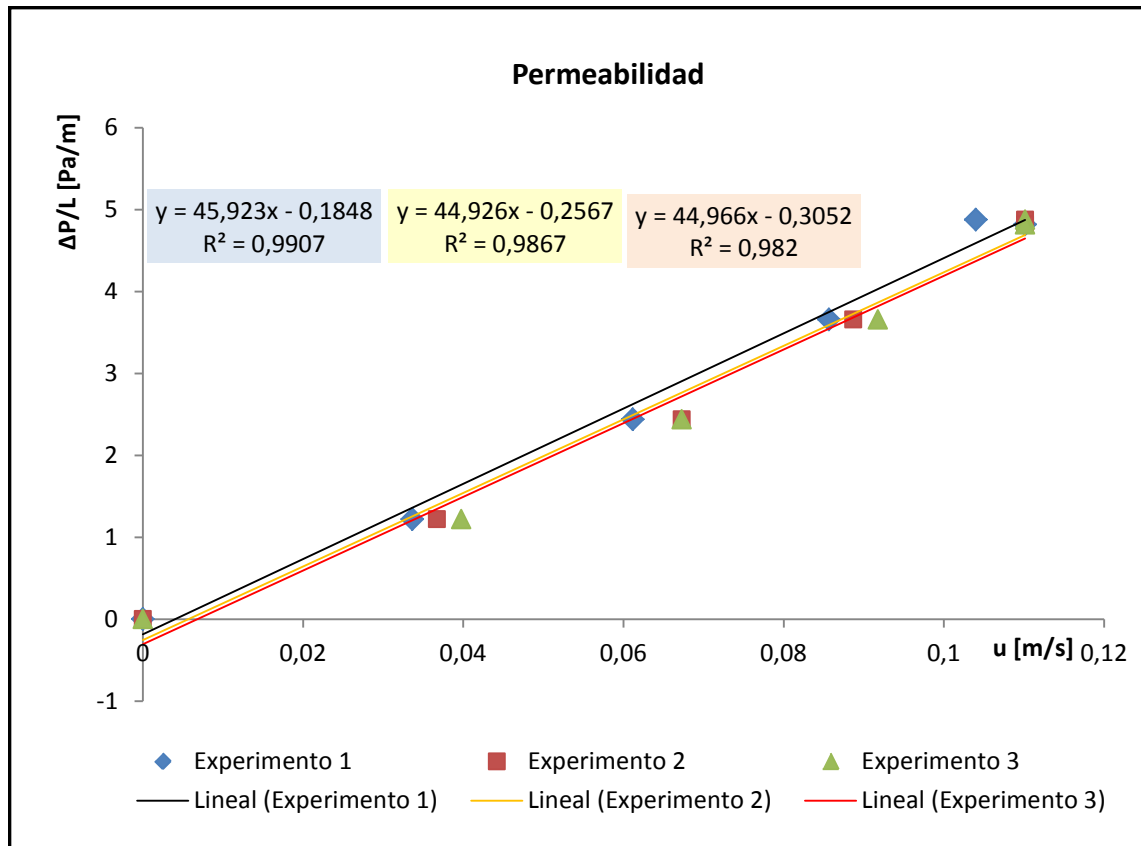


Figura D. 14 Representación grafica " $\frac{\Delta P}{L}$ vs. u ".

Tabla D. 7 Permeabilidad a partir de los datos experimentales

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Media experimental
m	45,923	44,926	44,966	45,272
K [10⁻⁷] [m²]	3,92	4,01	4,00	3,98

Conclusiones

Los valores de la permeabilidad son un poco elevados respecto a los valores encontrados en investigaciones realizadas anteriormente, aunque cabe resaltar que la permeabilidad depende de las características geométricas de cada partícula de estudio (forma, diámetro, grosor, superficie específica); por esta razón los valores obtenidos experimentalmente variaran de un estudio a otro incluso para una misma partícula. A pesar de esta situación estos datos no se pueden considerar como fiables debido a las falencias que se han producido a lo largo del desarrollo experimental.